

# 栃木市に現存する歴史的建造物の地震被害および 構造特性に関する調査研究

横内 基\*<sup>1</sup>, 大島 隆一\*<sup>2</sup>, 大橋 好光\*<sup>3</sup>

Research on Earthquake Damage and Structural Characteristics of  
Existing Japanese Traditional Buildings in Tochigi City

Hajime YOKOUCHI , Ryuichi OSHIMA , Yoshimitsu OHASHI

Tochigi City in Japan is left with many traditional buildings, which form the historic townscape. The 2011 off the pacific coast of Tohoku Earthquake on March 11, 2011 and subsequent aftershocks caused damage to many of these traditional buildings. Only few data are available on seismic performance of these buildings at present. Therefore, in this paper, the researchers conducted study and survey relevant for these buildings. The following activities were taken place.

1. Collecting and analyzing seismic records observed around the area concerned as well as evaluating input motion characteristics for the subject area.
2. Field survey was conducted to understand the damage situation caused by series of earthquakes. Then consider the relationship between the damage trends and the various influencing factors.
3. Vibration measurements were performed on traditional buildings in the subject area, and comprehend the vibration characteristics of traditional buildings.

**KEYWORDS :** The Great East Japan Earthquake, Seismic Performance, Seismic Response, Vibration Measurement, Preservation Districts for Groups of Traditional Buildings

## 1. はじめに

栃木県栃木市では、図 1 に示す栃木町地区と嘉右衛門町地区の 2 地区に対して、歴史的資産を保全しながら、より安全・安心な町並みをつくるべく、伝統的建造物群保存地区の制度を活用した町

並み整備を進めている。この内、嘉右衛門町地区については本年 7 月に重要伝統的建造物群保存地区に選定され、栃木町地区については伝統的建造物群保存地区指定の準備を推進しているところである。なお、以降では嘉右衛門町地区と栃木町地区を総称して単に“伝建地区”と呼ぶこととする。

\*1 建築学科 (Dept. of Architecture), E-mail: yokouchi@oyama-ct.ac.jp

\*2 建築学科 (Dept. of Architecture), E-mail: o-shima@oyama-ct.ac.jp

\*3 東京都市大学工学部建築学科・教授 (Professor, Dept. of Architecture, Tokyo City University)

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震ならびにその後の余震(以下、一連の地震)では、この伝建地区およびその周辺に現存する数多くの歴史的建造物(江戸末期から昭和初期に建てられた建造物)に被害が生じた。伝統的建造物群を恒久的に維持保全するためには、突然の地震に備えて学術的裏付けに基づいた万全の耐震対策を構築することが重要である。しかしながら、当該建造物群の耐震性に関するデータは極めて乏しいのが現状である。



図1 伝建地区全体図

そこで、土蔵造りを主とする伝統的建造物群の地震防災対策に資する基礎データを蓄積することを目的に、栃木市に現存する歴史的建造物の地震被害と耐震性に関する調査研究を実施する。

## 2. 栃木市伝建地区の特徴

### 2.1 町並み形態

伝建地区およびその周辺には、現在でも見世蔵(店舗兼住宅として使うことを目的とした土蔵造りの建造物)や土蔵をはじめとする歴史的価値の高い建造物が群として数多く残り、特徴的な歴史的風致をつくり上げている。伝建地区内には、表1に示すように約330棟(2011年4月1日時点)の歴史的建造物が現存している。この地区では、道路に面する間口が狭く、奥行が長い住戸区画が多い。そのため、表通りに面して間口の区画幅を最大限に利用した見世蔵や木造店舗が建ち並び、その背後の木造住居や土蔵と一体化されているものも多い。このような場合、木造民家と土蔵造り等の異種構造を一体化しているために、立体効果や連成効果等によって単体の建造物とは全く異なる耐震性能を示すことが考えられる。

### 2.2 伝建地区周辺の地盤構造

栃木市は栃木県の西南部にあり、地形は足尾山

表1 歴史的建造物の内訳

	栃木町地区*	嘉右衛門町地区	計
見世蔵	27	7	34
塗屋	3	1	4
土蔵	66	56	122
石蔵	7	6	13
木造店舗・住宅	93	56	149
社寺建築等	8	3	11
その他	0	1	1
計	204	130	334

※調査開始当初に計画されていた地区内に現存する建造物数

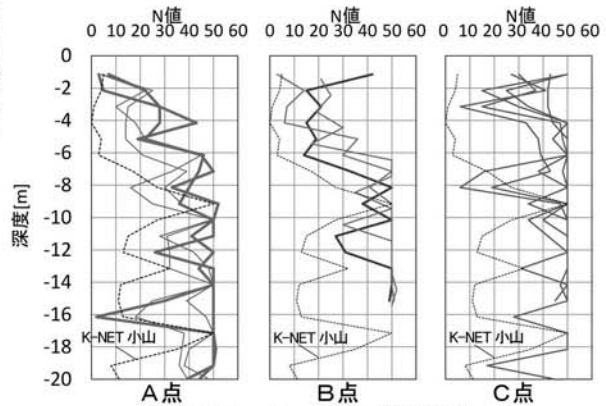


図2 ボーリング柱状図

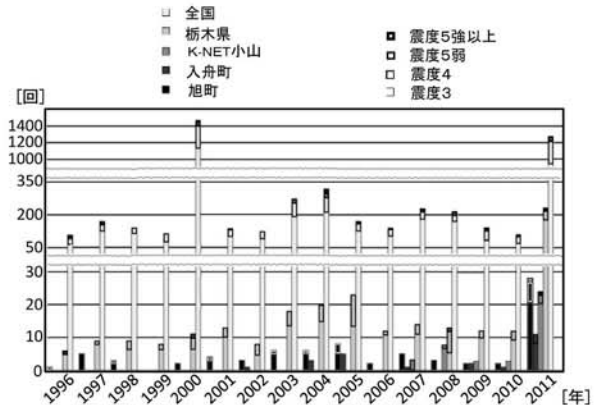


図3 年別地震発生回数(震度3以上)

地の東南部を占める山地部と、その東縁に広がる平地部とから成っている。伝建地区がある巴波川流域の市街地は、思川水系によってつくられた低地地形で、主として段丘礫層と関東ローム層、あるいは砂礫層等の表層堆積層から成っている<sup>1)</sup>。伝建地区周辺(図1中A~C点)のボーリング柱状図を図2に示す。いずれのボーリング地点も表層直下から主に砂礫層で構成されており、GL-4~6m以深にN値が40以上の締まった層が存在する。部分的にコントラストの大きい層が存在する地点もあるが、伝建地区周辺の地盤構造は比較的良好であることが確認できる。なお、地下水位はいずれの地点でもGL-1.8~2.5m付近にあることがわかった。



2. 3 栃木県および伝建地区周辺の地震歴

栃木県内における主な被害地震は、文献 2)~5) によると 1659 年以降 350 年以上の間に 15 回程度発生している。図 3 には、気象庁が栃木市旭町(市立図書館)に震度計を設置した 1996 年以降の震度 3 以上の地震発生回数を年別に示している。1996 年から 2011 年までに全国で最大震度 3 以上の地震が 5191 回観測されている。それに対して、栃木県内の観測回数は 402 回(全国の 7.7%)であり、さらに伝建地区近傍の栃木市旭町では 81 回(全国の 1.6%)であった。この結果より、栃木県は全国でも地震発生回数が少なく、さらに県内でも栃木市の伝建地区周辺では特に地震の発生頻度が少なかったことが明らかになった。

3. 東北地方太平洋沖地震の特性

3. 1 伝建地区周辺で観測した地震波の概要

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分に発生した東北地方太平洋沖地震(本震)について、伝建地区周辺の気象庁発表震度を表 2 に、栃木市庁舎の表層地盤で観測した加速度波形の時刻歴を図 4 に、最大値一覧を表 3 に示す。各図表には、栃木市庁舎の最寄りの K-NET 観測点である K-NET 小山(TCG012)の記録も併せて示している。なお、栃木市庁舎と K-NET 小山は直線距離で約 12km 離れている。気象庁の発表<sup>9)</sup>によると、伝建地区周辺の震度は栃木市旭町(市立図書館)で震度 5 弱、栃木市入舟町(栃木市庁舎)で震度 4 であり、栃木市庁舎における地動加速度は NS 方向の 196.8Gal が最大であった。これらの値を K-NET 小山の記録と比較すると、設置条件の違いによる影響も考えられるが、栃木市庁舎で観測された地震動の各値の方が著しく小さいことがわかった。

3. 2 Sa-Sd スペクトル

本震以降の 2011 年 9 月 30 日までに栃木市庁舎で観測した地震(合計 111 波)の Sa-Sd スペクトル(h=5%)を図 5 に示す。図中には、限界耐力計算<sup>7)</sup>での工学的基盤における標準スペクトル Sa<sub>0</sub>(稀に発生する地震)を限界耐力計算法の略算法による第 2 種地盤の地盤増幅率で増幅させたスペクトル

表 2 発表震度

栃木市入舟町(栃木市庁舎)	4
栃木市旭町(市立図書館)	5弱
小山市神鳥谷町(K-NET小山)	5強

表 3 最大値一覧

項目	観測地点	NS	EW	UD
加速度 [Gal]	栃木市庁舎	196.8	129.0	77.3
	K-NET小山	298.6	417.6	254.8
速度 [kine]	栃木市庁舎	10.1	8.4	6.4
	K-NET小山	30.9	25.5	10.5
変位 [mm]	栃木市庁舎	53.0	67.8	69.3
	K-NET小山	172.8	158.8	94.1

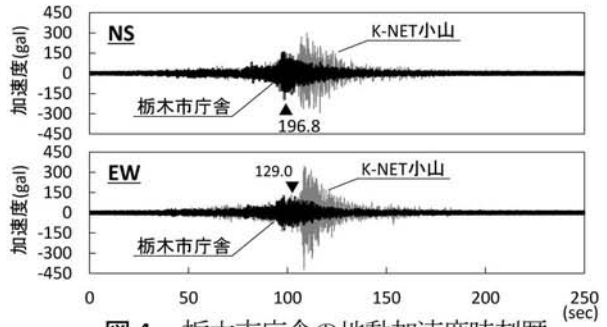


図 4 栃木市庁舎の地動加速度時刻歴

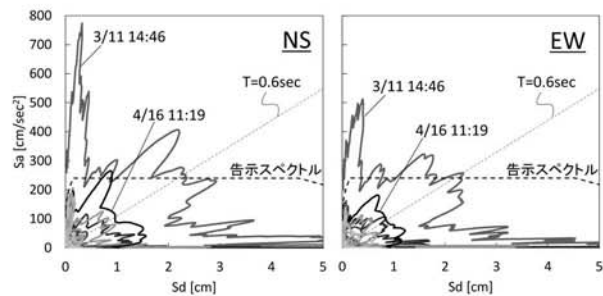


図 5 Sa-Sd スペクトル(h=5%)

(以下、告示スペクトル)を併せて示している。まず、3月11日の本震について見ると、地震動の特性として建物周期がおよそ 0.6 秒を境に応答特性に著しい差異が見られる。つまり建物周期が 0.6 秒以下の建物の応答が大きくなる傾向が見られ、その大きさは告示スペクトルと同等以上であった。特に NS,EW 方向共に建物周期が 0.10~0.20 秒および 0.45~0.50 秒の応答が大きくなる特性が確認できた。

一方、一連の地震を比較すると、本震による地震応答が最も大きく、次いで 4 月 16 日 11 時 19 分に発生した茨城県南部を震源とする地震(茨城県鉾田市当間で最大震度 5 強、栃木市旭町:震度 4、栃木市入舟町:震度 4)が大きいことがわかった。この地震では NS,EW 方向共に 0.40 秒付近の建造物の応答が大きくなる特性であった。

今回の一連の地震により被災した伝統的建造物の中には、所有者も被災時期を把握していないが余震によって被害が発生、あるいは拡大したものもあった。それらは 4 月 16 日の余震による影響が大きいと推察される。

## 4. 東北地方太平洋沖地震による建造物の被害状況

### 4. 1 現地調査の方針および方法

現地調査の主な目的は、一連の地震による歴史的建造物の被害状況を把握すること、さらにそれら建造物の耐震性能を評価するために必要な建物規模や構造部材寸法等を実測することである。

現地調査は、①外観目視調査、②聞取調査、③構造実測調査、④振動測定、⑤詳細調査の5つのグレードで行った。調査を行った建造物(272棟)の内訳は表4に示す通りであり、調査を開始した時点で栃木市より報告を受けた歴史的建造物(334棟)の81%の建造物に対していずれかの調査を実施した。

現地にて確認できた損傷については、その場で可能な限り所有者に損傷の経過を確認したが、所有者自身も把握できていないことが多く、一連の地震被害によるものかどうかを明確にできない事例が多々あった。そこで、一連の地震による被害に拘らず現地にて確認した損傷をすべて記録し、調査終了後にそれぞれの損傷経過を表5に示すように分類した。また、「木造建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針」<sup>8)</sup>に示される部位別の損傷状況ランクを参考にして、現地にて確認したそれぞれの損傷の程度を損傷ランクⅠ(軽微)→Ⅱ(小破)→Ⅲ(中破)→Ⅳ(大破)→Ⅴ(倒壊)の5段階で定量的に評価した。なお、損傷経過や損傷程度の判断は、主観的にならないように複数人で議論して決定した。

### 4. 2 被害の全体概要

損傷経過別の棟数分布を建造物種別に拘らず図6に示す。ここで、損傷経過が異なる複数の損傷が確認された建造物については、表5に示した順番で最上位に該当する建造物として算入した。調査した建造物272棟の内、64%にあたる175棟(552箇所)において、何らかの損傷が確認された。この内、一連の地震による損傷(損傷経過◎)、ないしは一連の地震によると思われる損傷(損傷経過○)がある建造物が119棟、さらにその他に以前からの損傷が地震により進展したと思われる建造物(損傷経過▲)が26棟あり、合計で145棟が一連の地震によって何らかの損傷を被ったことになる。

また最大損傷ランク別の建造物の棟数分布をその損傷経過に対応させて建造物種別に拘らず図7に示す。一連の地震による被害(損傷経過◎と○)では損傷ランクⅡが最も多く、それらの建造物以外で以前からの損傷が進展したと思われる被害(損傷経過▲)については損傷ランクⅢやⅣで多く確認された。損傷ランクをⅤにした5棟については、いずれも今回の地震以前から生じていた損傷に起因するものであった。その状況としては、土塗壁の大規模崩落やそれに係る貫や竹小舞の露出・折損が進展した土蔵が3棟、柱脚が腐朽し土台と離縁している木造住居が1棟、残留変形や経年劣化が顕著な木造住居が1棟であり、いずれも倒壊はしていないが構造耐力上致命的な著しい損傷を受けていると判断した。なお、この内の土蔵1棟と木造住居2棟については空き家であった。

表4 現地調査建造物の内訳

建物種別	構造種別	調査1	調査2	調査3	調査4	調査5	合計
見世蔵	土蔵造り	2	21	2	2	1	28
土蔵	土蔵造り	28	33	24	18	1	104
塗屋	木造	0	0	1	0	0	1
木造住宅・店舗	木造	35	54	16	8	0	113
社寺	木造	2	9	0	0	0	11
石蔵	組積造	4	5	4	1	0	14
その他		0	0	0	1	0	1
合計		71	122	47	30	2	272

表5 損傷経過の分類

記号	損傷経過
◎	一連の地震による被害が明らかな損傷
○	所有者は把握していないが、一連の地震被害と思われる損傷
▲	以前からの損傷が一連の地震によって進展した(したと思われる)損傷
△	所有者は把握していないが、一連の地震とは無関係と思われる損傷
×	一連の地震とは無関係の損傷

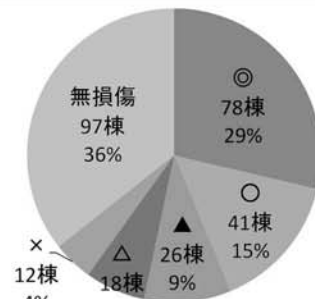


図6 損傷経過別棟数分布

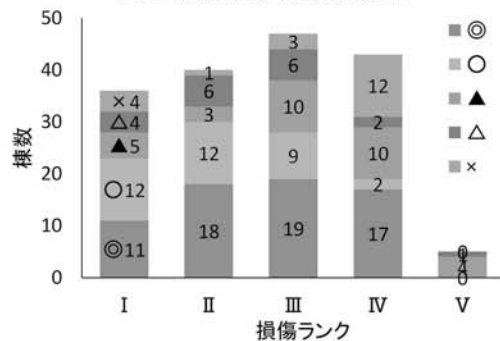


図7 最大損傷棟数分布



### 4. 3 建造物種別ごとの被害の特徴

#### (a) 見世蔵・土蔵

見世蔵・土蔵の損傷部位別の棟数分布を図8 (a)に示す。見世蔵と土蔵では損傷の形態は概ね似ており、主に耐力壁、屋根、鉢巻の損傷が多かった。一連の地震に係る被害(損傷経過◎,○,▲)について見ていくと、まず耐力壁の損傷形態としては、損傷ランクⅠ～Ⅲ程度の開口隅角部周りのひび割れや、外壁の部屋内側に水平ひび割れが多く確認された。この水平ひび割れは、貫もしくは鉢巻下端にほぼ対応する位置に生じていた。また、損傷ランクをⅣと判定したものの多くは、土塗壁が一部崩落するほどの損傷を受けたものが多かった。

次に、屋根については、損傷ランクⅡ～Ⅲ程度の棟瓦の落下や瓦が部分的にずれる被害が多かった。なお、被害を受けた瓦は全て土葺きであった。さらに、土蔵造り特有の部位である鉢巻については、仕上げの漆喰が剥落した程度の軽微な被害のほか、塗土が大部分にわたり崩落する被害が7棟であった。また、鉢巻が影響していると考えられる被害として、上述したように鉢巻下端位置に概ね対応する内部壁面の水平ひび割れ(写真1)を16棟で確認し、その中には水平ひび割れ上部の壁が容易に視認できるほど屋外側に傾斜しているものもあった。

#### (b) 木造(住居・店舗)

木造(住居・店舗)の損傷部位別の棟数分布を図8 (b)に示す。木造(住居・店舗)では、主に耐力壁、屋根、軸組の損傷が目立った。一連の地震に係る被害(損傷経過◎,○,▲)について見ていくと、耐力壁については損傷ランクⅠ～Ⅱ程度のひび割れが多かった。また、屋根の被害としては垂木の折損により屋根が陥没したために損傷ランクⅣと判断したものが1棟あるが、それ以外は見世蔵や土蔵と同様に、土葺きの屋根で棟瓦の落下や瓦が部分的にずれる被害が多かった。軸組については柱が1～3°程度の範囲で傾斜している事例が多かった。

### 4. 4 耐久性に係る被害

一連の地震に拘らず構造部材の腐朽や虫害、雨漏り等の耐久性に係る損傷は28棟で確認され、この内の12棟については、その損傷が地震によって露わになったと考えられるものであった。耐久性に起因する特徴的な地震被害としては、土蔵造りの大壁において厚い土塗壁に埋没しており通常ならば視認できない部分の土台や柱が腐朽していたために、壁が地震動によって沈下し大規模崩落を招いた事例があった(写真2)。また、土蔵や見世蔵では、大谷石や岩舟石などの基礎石が建造物の外周を囲んでいるため、床下の通気性が悪く、土台や1階の床板が腐朽・脱落している事例が今回の地震被害に関係無く11棟で確認された。

### 4. 5 町並み形態等に伴う被害

今回の地震によって、近接している隣棟との衝突によると思われる被害(写真3)が12棟で確認された。その中には、見世蔵の裏手に連結している木造住居で地震以前から生じていた柱の傾斜が、

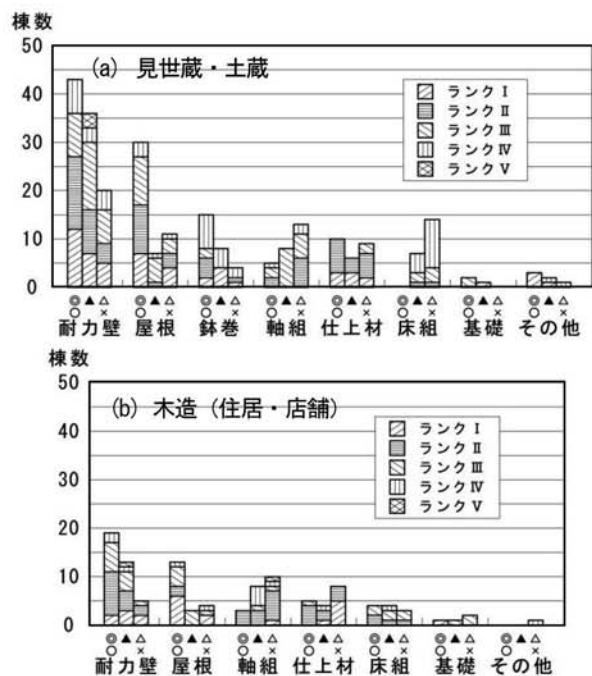


図8 損傷部位別の棟数分布



写真1 土壁の水平ひび割れ

写真2 柱脚の腐朽

写真3 隣棟との衝突

見世蔵とは反対方向へ大きく進展(最大 $3^{\circ}$ 程度)した事例(写真4)があった。現時点でその原因は明らかでないが、木造住居に比べて剛性の高い見世蔵が、木造住居を反対側へ弾き飛ばすような現象が起こったことも考



写真4 住居の柱の傾斜



写真5 2次被害の様子



写真6 道路に近接する土蔵

えられる。さらに、今回の地震被害ではないが、隣棟からの雨水の撥ね水を受けて、仕上げ塗りの漆喰が時間経過とともに構面全面にわたり剥落してしまっただけでなく、現時点では主要構造部に及ぼす影響は小さいものと考えられるが、そのまま放置し続けることによって主要構造部に致命的な影響を及ぼすことが危惧される。

一方、残念ながら今回の地震を機に数棟の土蔵が解体された。その内の1棟は、風雨対策のための被災部位の応急措置が不十分であったために、風雨によって土塗壁が大規模崩落を招き解体に至ってしまった(写真5)。また、道路境界に近接して建つ土蔵(写真6)の瓦が地震によってずれたことで、所有者が公道に落下することを危惧して解体に至った事例もあった。二度とこのような事態を招かないために、応急措置への迅速かつ適切な対応や、危険箇所ならびに避難経路等の共有などの防災体制について、所有者と自治体らが連携して構築する必要性を改めて認識した。

## 5. 歴史的建造物の建物規模および主要構造部材の傾向

### 5. 1 対象建物ならびに分析方法等の概要

現存する歴史的建造物に対して、筆者らが実施した現地実測調査データを基に、建造物の耐震性能に係る建物規模や主要構造部材寸法等について分析する。

分析にあたって、先に示した現地実測調査データのほかに、河東らによって実施された既往の調査データ<sup>9,10</sup>から、建物規模や構造部材寸法等を評価するために必要な情報を抽出した。評価項目は、延床面積、各階床面積、建物重量、柱・壁の

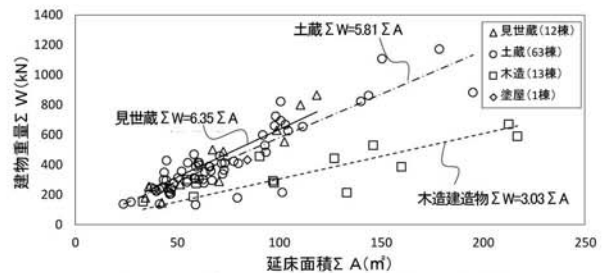


図9 建物重量と延床面積の関係

寸法および量、ベースシア係数とした。なお、栃木市の歴史的建造物の中には、隣接区画の建造物との隙間が極めて狭く、場所によっては敷地境界を跨ぎ隣家と一体化させているものや、表通りに面して建てられた見世蔵や木造店舗と、その背後の木造住居や土蔵とが一体化されているものなどがある。本検討では、それら複数棟が一体となっている建造物については、それぞれ個別の棟として分析した。

### 5. 2 建物重量と延床面積

各建造物の建物重量と延床面積の関係を図9に示す。ここで、建物重量は「重要文化財(建造物)基礎診断実施要領(以下、基礎要領)」<sup>11)</sup>に示される床面積あたりの重量に従って算出した。延床面積は木造建造物と土蔵が $30 \sim 220 \text{m}^2$ 、見世蔵が $40 \sim 120 \text{m}^2$ の範囲に分布している。見世蔵や木造建造物については棟によってその大きさが区々であるのに対して、土蔵については $50 \text{m}^2$ 前後のものが多く見られる。一方の建物重量については、建造物種別ごとに延床面積に対して比例的に上昇する傾向が見られる。線形近似式により延床面積から建物重量を評価すると、木造建造物は $3.03 \times \Sigma A$ となるのに対して、見世蔵の建物重量は $6.35 \times \Sigma A$ 、土蔵は $5.81 \times \Sigma A$ となり、土蔵造り(見世蔵



と土蔵を合わせてこのように総称する)は木造に比べて土塗壁の壁厚が大きいために延床面積が同じであっても建物重量が大きくなっている。ここで算出した建物重量は、床面積あたりの重量から導いた値であるため、高い精度は期待できないが、建物重量を把握するための一つの目安になると考える。

### 5.3 柱断面寸法と壁厚の関係

各建造物の主要な柱断面寸法と土塗壁厚さの関係を図10に示す。柱寸法は、木造が□100~130mm程度、土蔵造りが□100~160mm程度であった。また、図11に示す主要な柱断面寸法と1階床面積との関係を見ても、柱寸法が床面積に対応して大きくなるような傾向は見られなかった。土塗壁の壁厚(仕上げ塗も含む)については、木造も土蔵造りも柱寸法に依存する傾向は無く、木造では60mm前後を中心に50~100mm程度の範囲で分布し、土蔵造りではおよそ220mm前後を中心に150~300mm程度の範囲で分布している。

### 5.4 柱量

1階柱断面面積の総和と1階床面積との関係を図12に示す。図中には、重要文化財(建造物)所有者診断<sup>12)</sup>に示されている床面積に対して柱の本数や太さが耐震的に適切であるかどうかの判断基準を併せて示している。所有者診断では、床面積あたりの柱量が基準値より大きいものほど耐震的に適切との評価になる。

土蔵は床面積の0.01倍を下限として概ね分布しているのに対して、木造建造物は床面積の0.005倍前後に分布する傾向が見られる。土蔵に比べて木造建造物の柱量が少ないのは、ほとんどの土蔵の柱が建物外周に一定間隔(概ね910mm)で規則的に配置されているのに対して、木造建造物では間取りによって柱間隔が不規則であること、さらに同じ床面積でも土蔵に比べて木造建造物の柱断面が小さいこと(図11参照)などが理由として挙げられる。また、見世蔵の柱量は、土蔵よりも少なく、木造建造物と同程度である。これは間口方向に大きな開口部があるために、そ

この柱量が少なくなるからである。

### 5.5 壁量

建造物の主要な耐震要素として、無開口の全面壁(土塗壁)が挙げられる。ここでは、間口と奥行の各方向に抵抗する全面壁の断面面積を算出し、それを各建造物の延床面積で除して基準化した数値を壁量と定義して検討する。1階の間口方向と奥行方向の壁量を比較して図13に示す。土蔵の壁量は、延床面積のおよそ0.1倍以下の範囲で棟によって区々に分布しているのに対して、木造建造物では垂壁付独立柱が多いため、土蔵に比べて壁量は少なく、およそ延床面積の0.02倍以下の範囲に分布している。見世蔵については、奥行方向は棟によってその量に差異があり、概ね土蔵と同じような傾向が見られるのに対して、大きな開口部を有する間口方向については棟による差異が小さく、

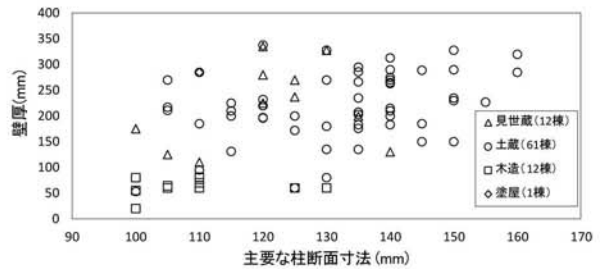


図10 土塗壁厚さと主要な柱断面寸法の関係

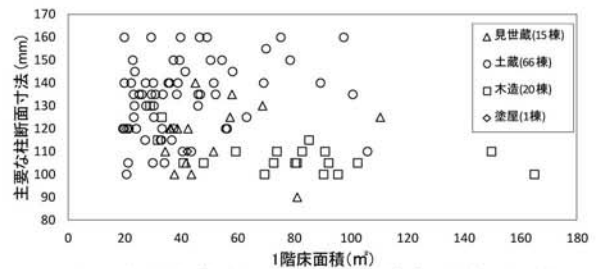


図11 主要な柱断面寸法と1階床面積の関係

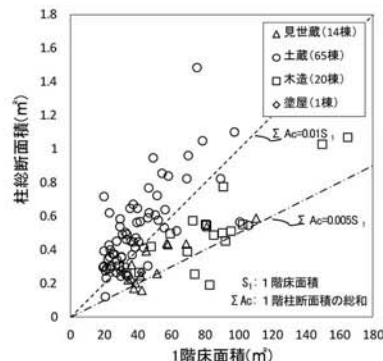


図12 1階柱断面面積の総和と1階床面積の関係

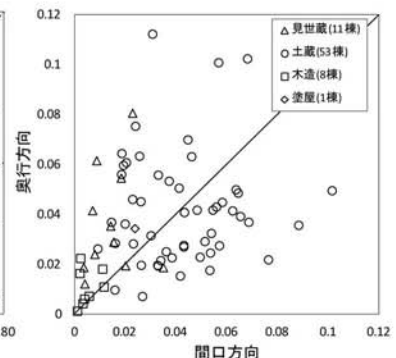


図13 1階各方向壁量の関係

壁量は概ね延床面積の0.02倍程度の一定であることが確認できた。

### 5. 6 土蔵造りの保有水平耐力

土蔵造りの保有水平耐力などに関する既往の研究は少なく、耐震性に関する学術的な裏付けが少ない。そこで、土蔵造りの全面壁にのみ着目して保有耐力やベースシア係数を概算的に算出し検討する。算出にあたり、まず基礎要領で想定している全面土塗壁の荷重変形関係に従い、各全面土塗壁の断面積からせん断耐力を求めた。そして、間口と奥行の各方向に抵抗する全面壁のせん断耐力の総和をそれぞれ算出し、それを各建造物の建物重量で除した値をベースシア係数とした。建物重量には5.2節で算出した値を用いた。

1層のせん断耐力とベースシア係数について間口方向と奥行方向で比較したものを図14および図15に示す。土蔵は方向に関係なく50~500kN程度の耐力を有し、ベースシア係数にすると $C_B=0.2\sim 1.0$ 程度の範囲に分布することがわかった。一方の見世蔵は、先の壁量で述べたのと同様に奥行方向は概ね土蔵と同じ傾向であるのに対して、間口方向については奥行方向よりも小さく、棟によらず耐力は100~200kN程度となり、ベースシア係数で $C_B=0.2$ 程度になることがわかった。なお、一部では $C_B=0.2$ を下回る建造物があるものの、それらの建造物は今回の一連の地震によって顕著な構造被害は生じていなかった。

## 6. 歴史的建造物の振動性状

### 6. 1 対象建物および振動測定方法

歴史的建造物の地震対策及び耐震性能評価や損傷評価等に資するデータを蓄積することを目的に振動測定を行い、それら建造物の固有周期や減衰定数を評価する。

振動測定を実施した建物は全30棟であり、それらの内訳は表2の調査4として示した通りである。これらの建造物に対して、常時微動測定(一部の建造物については人力加振測定を併せて実施)を行い、固有周期と減衰定数を評価した。

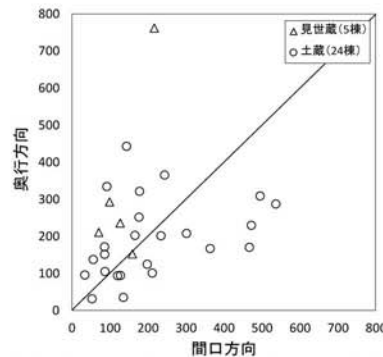


図14 1層せん断耐力(kN)の関係

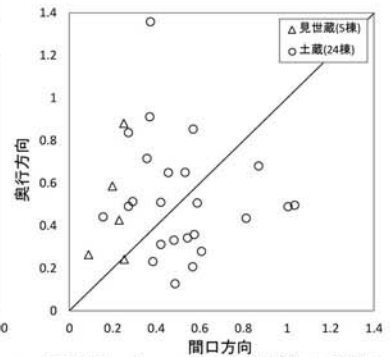


図15 ベースシア係数の関係

表6 振動測定実施要領

測定方法	常時微動測定 (一部、人力加振測定を併行)
振動計	サーボ型速度計
振動計設置位置	1、2階、小屋組
サンプリング周波数	100Hz(一部、200Hz)
測定時間	10分間
スペクトルの平滑化	Hanningウィンドウ(バンド幅:0.029Hz)
伝達関数	パワースペクトル比(小屋組/1階)
減衰評価	常時微動測定: RD法
	人力加振測定: 自由振動

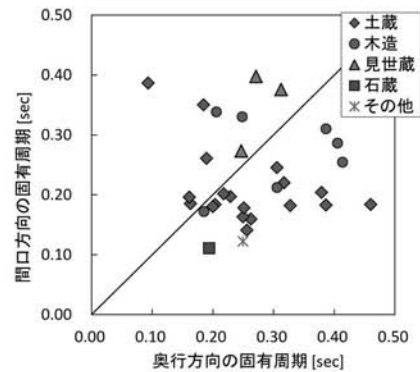


図16 1次固有周期の間口方向と奥行方向の関係

振動測定の実施要領を表6に示す。測定は、サーボ型速度計(東京測振製:VSE-15D)を1階と2階、小屋組の図心位置付近に設置し、間口方向と奥行方向についてそれぞれ計測した。測定サンプリング周波数は100Hz(一部200Hz)とした。得られた速度波形を4000個(40秒)ずつ抽出して、それぞれのパワースペクトルを求め、それらをアンサンブル平均したスペクトルの卓越周期から1次固有周期を評価した。減衰定数は、常時微動測定についてはRD法<sup>13)</sup>で、人力加振測定については自由振動波形から対数減衰<sup>13)</sup>によって評価した。

### 6. 2 固有周期

間口方向と奥行方向の1次固有周期の関係を図16に示す。木造の住居や店舗では、それぞれの



建造物の間口方向と奥行方向とで固有周期に大きな違いは無く、概ね0.17~0.41秒であった。土蔵については、全ての棟で間口や奥行の方向に関係なく、短辺方向(妻側)の固有周期が長辺方向(平側)よりも長くなり、短辺方向で0.19~0.46秒、長辺方向で0.09~0.25秒であった。これは、短辺方向では負担する建物重量に比べて剛性に寄与する土塗壁が少ないことが最も影響していると思われる。短辺方向の固有周期が長い上位3棟は、辺長比(短辺方向の長さに対する長辺方向の長さの比)が2.7~3.3と大きく、測定を実施した他の土蔵に比べて特異な平面形状をしているものであったために、その影響が顕著に表れている。

見世蔵については、間口方向(平側、長辺方向)が0.27~0.40秒、奥行方向(妻側、短辺方向)が0.25~0.31秒であった。それぞれの棟ごとの間口方向と奥行方向の固有周期に著しい差異は無いものの、全ての棟で短辺方向(奥行)に比べて長辺方向(間口)の固有周期が長くなり、土蔵とは全く逆の傾向が確認された。これは、大きな開口部がある間口方向の壁量が少なく剛性が低いために、固有周期が長くなっているものと考えられる。

### 6. 3 減衰定数

間口方向と奥行方向の減衰定数の関係を図17に示す。木造建築物の地震応答解析では、内部粘性減衰定数として $h = 3 \sim 5\%$ を用いることが多い。それに対して、本研究で得られた減衰定数は、それぞれの棟における間口方向と奥行方向の減衰定数に大きな違いは無く、また建造物種別に拘らず概ね2~5%に集中する結果であった。図18には固有周期と減衰定数の関係を示している。いずれの種別および方向でも、固有周期と減衰定数との間には明瞭な相関性は見られなかった。

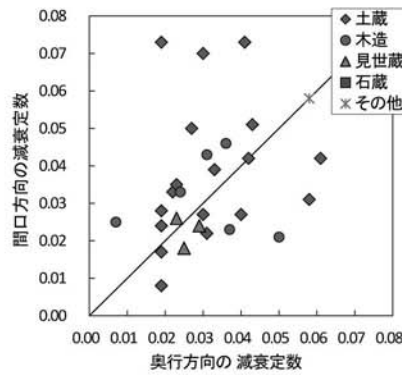


図17 減衰定数の間口方向と奥行方向の関係

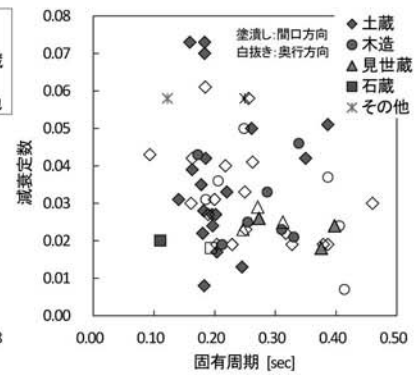


図18 固有周期と減衰定数の関係



写真7 見世蔵の外観および地震計設置状況

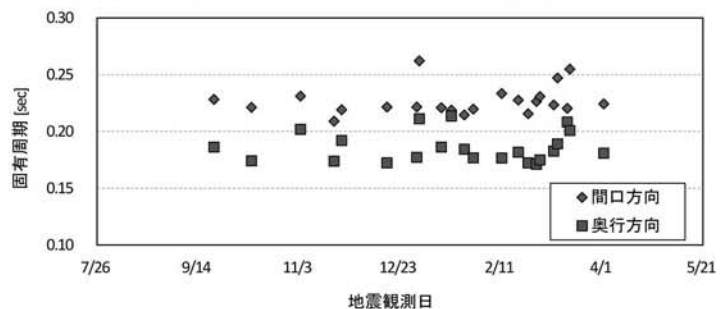


図19 1次固有周期の推移

## 7. 見世蔵の地震応答性状

見世蔵の地震応答性状を把握することを目的に、伝建地区内にある小山高専サテライトキャンパスの1階床上(下部)および隣接する見世蔵(平入り、差掛け屋根)の小屋組上(上部)に地震計を設置し、強震観測を継続して行っている。見世蔵の外観および地震計設置状況を写真7に示す。強震観測を開始してから2012年4月1日までに上部と下部で計22回の地震を観測(加速度記録)した。まずは、これらの上部と下部の加速度波形を周波数領域に変換し、伝達関数(パワースペクトル比:上部/下部)を求め1次固有周期を評価した。1次固有周期の推移を図19に示す。固有周期は、間口・奥行方向共に、観測を開始した当初から伸びるような傾向は見られず、数度の地震を経験した後も建造

物の剛性が低下することなく、構造的に概ね健全であることが確認できる。

図 20 には見世蔵の地震応答性状を把握するために、上部と下部の最大加速度の関係を示している。下部の最大加速度に対する上部の最大加速度の比(以下、応答倍率)は、地震波に拘らず間口方向(平側)が 1.5 倍程度であるのに対して、奥行方向(妻側)では 3.5 倍程度となり、奥行方向の方が大きく増幅されることがわかった。このように奥行方向の応答倍率が大きくなる原因

を探るために、応答倍率の計算値と実測値の比較を図 21 に示す。ここで、計算値とは各観測地震波から評価した固有周期(図 19 参照)となる 1 質点系モデルに対して下部の観測地震波を入力する弾性応答解析(内部粘性減衰  $h = 5\%$ )を行い、その最大応答加速度を入力地震波の最大加速度で除した値である。間口方向の実測値は、計算値とよく一致する傾向が見られ、実挙動は概ね 1 質点系で模擬できる様子が伺える。一方の奥行方向については、計算においても応答倍率が間口方向より大きくなることが確認できる。さらに、実測値は計算値よりも大きくなり、奥行方向の実地震時挙動については 1 質点系モデルによる周期特性を考慮した検証だけでは説明できない複雑な挙動を示していることが確認できた。

## 8. あとがき

本研究では、伝統的建造物群の地震防災対策に資する基礎データを蓄積することを目的に、栃木県栃木市に現存する歴史的建造物についての調査・研究を実施した。本研究より、東北地方太平洋沖地震による歴史的建造物の被害状況、および、被害をもたらした地震動の特性や地盤構造、建造物の振動特性などを明らかにした。

今回の調査研究によって明らかになった知見を活かし、地震に対してより安全・安心な町並みが形成されることが望まれる。

### 謝辞

本調査研究は、栃木市伝建(予定)地区の建造物調査委員会[委員長:荻谷勇雅・小山工業高等専門学校校長]における活動の一環として行ったものであり、現地調査は小山工業

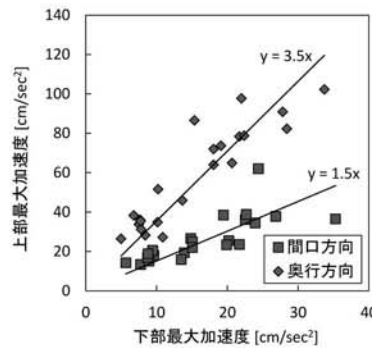


図 20 上部と下部の最大加速度の関係

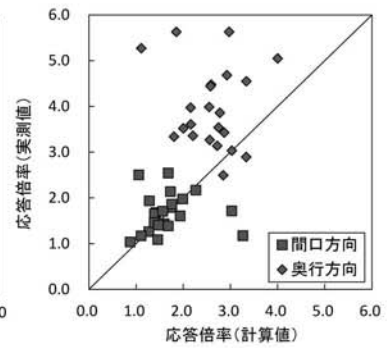


図 21 実測値と計算値の比較

高等専門学校横内研究室、同・大島研究室、東京都市大学大橋研究室が分担して実施した。なお、本調査研究の一部は栃木市からの受託事業として実施した。調査にご協力くださった所有者の皆様ならびに関係各位、さらに調査研究に協力した学生諸子に心より感謝申し上げます。

また、首都圏強震動総合ネットワーク(SK-net)の栃木市(TCH003)のデータ、ならびに防災科学技術研究所が運用する K-NET 小山観測点(TCG012)のデータを利用させて頂いた。

### 参考文献

- 1) 栃木市:栃木市史(史料編 自然・原始),1982.3
- 2) 宇佐美龍夫:新編日本地震被害総覧,東京大学出版会,1996.9
- 3) 竹内均総編集:せまり来る巨大地震,Newton 別冊,2001.2
- 4) 栃木の自然編集委員会:日曜の地学 栃木の自然をたずねて,築地書館,2007.4
- 5) 気象庁宇都宮地方気象台 HP:  
(<http://www.jma-net.go.jp/utsunomiya/sub/jisinsaiagai.html>)
- 6) 気象庁:「平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震」により各地で観測された震度について,報道発表資料,2011.3.30
- 7) 国土交通省住宅局建築指導課ほか監修:2007 年版建築物の構造関係技術基準解説書,日本建築センター,2007.8
- 8) 国土交通省住宅局建築指導課監修:震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針,日本建築防災協会,2001.9
- 9) 栃木市:栃木の町並み 蔵造りに関する調査報告書,1987.3
- 10) 栃木市教育委員会:栃木の町並みⅡ 旧日光例幣使街道沿線(泉町・嘉右衛門町・大町)の歴史的建造物調査報告書,2002.3
- 11) 文化庁:重要文化財(建造物)基礎診断実施要領,2001.4
- 12) 文化庁:重要文化財(建造物)所有者診断実施要領,1999.4
- 13) 日本建築学会:建築物の減衰,丸善株式会社,2000.10

【受理年月日 2012年 9月14日】